



EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

Raul Suurkask

ÜLIKONDENSAATORI KATSESTEND
SUPERCAPACITOR TEST BENCH

Bakalaureusetöö
Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendaja: professor Andres Annuk

Tartu 2021

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Autor: Raul Suurkask		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia	
Pealkiri: Ülikondensaatori katsestend			
Lehekülgi: 38	Jooniseid: 15	Tabeleid: 5	Lisasid: 2
Osakond / Õppetool: Energiakasutuse õppetool ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika 4.17. Energeetikaalased uuringud T140 Energeetika Juhendaja(d): Professor Andres Annuk, PhD Kaitsmiskoht ja -aasta: Eesti Maaülikool, 2021			
<p>Paljud on küll kuulnud ülikondensaatorist ja selle headest omadustest millest olulisemateks võiks lugeda kiiret laadimist ning väga suurt laadimis- tühjenemistsükli arvu, kuid ülikoolis tudengina pole olnud võimalust ülikondensaatorit näha või katsetada. Selle bakalaureusetöö eesmärgiks ongi valmistada katsestend kus tudengid saavad laboratoorses töös kokku panna katsestendi vastavalt skeemile, ning seejärel katsestendiga teostada mõõtmisi millest järeldada kuidas käitub ülikondensaator laadimisel ja tühjenemisel.</p> <p>Töö teoreetilises osas antakse ülevaade energiasalvestitest ja nende põhiparameetritest, ning kirjeldatakse ülikondensaatori ehitust, omadusi ja kasutusvaldkondi. Töö praktiline osa hõlmab endas katsestendi skeemi valmistamist programmiga Circuit wizard ning skeemi põhjal valmistati reaalne ülikondensaatori katsestend. Viimases osas on lõputöö autori poolt koostatud laboratoorne töö, mille vajalikud mõõtmised teostatakse ülikondensaatori katsestendiga. Katsestendiga on võimalik mõõta kuidas pinge muutub ülikondensaatori täitumisel ning on võimalik jälgida pinge muutumist ka ülikondensaatori tühjenemisel.</p>			
Märksõnad: Ülikondensaator, energia salvestus, katsestend, mahutavus			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Bachelor's Thesis	
Author: Raul Suurkask		Curriculum: Engineering	
Title: Supercapacitor Test Bench			
Pages: 38	Figures: 15	Tables: 5	Appendixes: 2
Department / Chair: Chair of Energy Application Engineering Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering 4.17. Energetic Research T140 Energy research Supervisors: Professor, Andres Annuk, <i>PhD</i> Place and date: Estonian University of Life Sciences, 2021			
<p>Many have heard of the supercapacitor and its good properties. One of the most important properties are fast charging and very large of charge-discharge cycles, but as student in university it has not been possible to see or test the supercapacitor. The aim of this bachelor's thesis is to prepare a test bench, where students can assemble a test bench in the laboratory according to the scheme, and then perform measurements with the test bench to see how the supercapacitor behaves during charging and discharging.</p> <p>The theoretical part of the work gives an overview of energy storages and their basic parameters, and describes the construction, properties and applications of the supercapacitor. The practical part of the work involves the to build test bench scheme with the program Circuit wizard, and on the basis of the scheme to build a supercapacitor test bench. In the last part, the author of the dissertation has prepared a laboratory work, the necessary measurements of which are performed with a supercapacitor test bench. With the test bench it is possible to measure how the supercapacitor voltage changes on charging and monitor how voltage decrease while discharging.</p>			
Keywords: Supercapacitors, Energy storage, Test Board, Capacity			

SISUKORD

SISSEJUHATUS	5
1. ENERGIASALVESTID	6
1.1. Energiasalvestite liigid	6
1.2. Energiasalvestite eesmärgid	6
1.3. Energiasalvestite parameetrid	7
2. ÜLIKONDENSAATOR	8
2.1. Ajalugu	8
2.2. Ülikondensaatori olemus ja ehitus	9
2.3. Ülikondensaatori omadused	10
2.4. Jagunemine	11
2.4.1. Elektriline kahekihiline kondensaator	12
2.4.2. Pseudokondensaator	12
2.4.3. Hüübriidkondensaator	12
2.5. Ülikondensaatori kasutusvaldkonnad	13
2.5.1. Ülikondensaatori rakendamine hübriid elektriautodes	13
2.5.2. Ülikondensaator tuuleenergeetikas	14
2.6. Ülikondensaatori tootjad	15
2.6.1. Maxwell Technologies	15
2.6.2. Skeleton Technologies	15
3. KATSESTENDI KOOSTAMINE JA KATSETAMINE	17
3.1. Katsestendi eesmärk	17
3.2. Katsestendi projekteerimine	17
3.3. Katsestendi konstrueerimine	18
3.4. Katsestendi tööpõhimõte	24
3.5. Katsestendi komponendid	25
3.6. Läbi viidavate katsete kirjeldus, tulemused ja järeldus	26
KOKKUVÕTE	29
SUMMARY	30
KASUTATUD KIRJANDUS	31
LISAD	34
Lisa 1. Laboratoorse töö juhend	35
Lisa 2. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta	38

SISSEJUHATUS

Ülikondensaatorid on muutumas järjest populaarsemaks ning ülikondensaatoritele leitakse üha rohkem rakendusi tehnoloogias. Neid iseloomustab madal hooldusvajadus, kiire laadimine, kõrged laadimisvoolud ja tühjenemisvoolud, väga palju laadimis- ja tühjenemistsükleid ning väga väiksed lekkevoolud. [1]

Antud bakalaureusetöö eesmärgiks on koostada ülikondensaatori katsestend ja valmistada laboratoorne töö, mille põhjal on võimalik tudengitel vastavalt skeemile katsestend kokku ühendada ja seejärel katsestendiga teostada mõõtmisi ning mõõtmistest järeldada, kuidas käitub ülikondensaator laadimisel ja tühjenemisel.

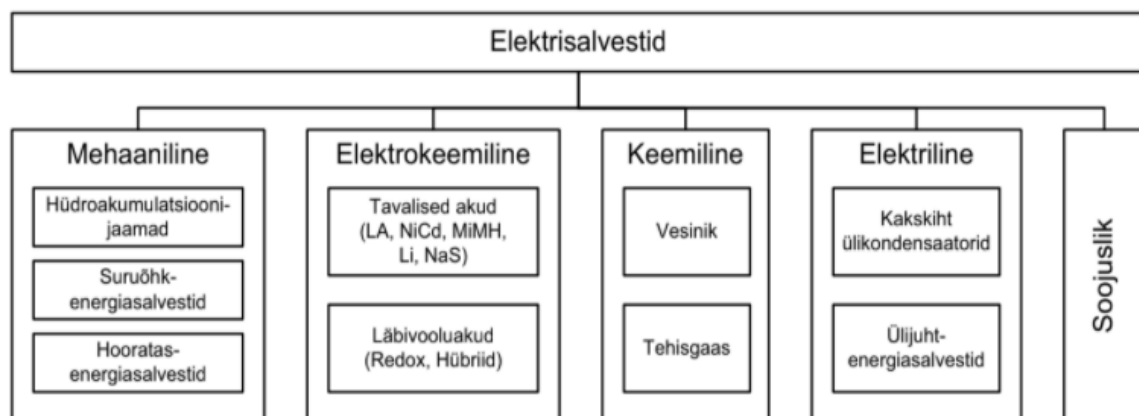
Töö esimeses osas antakse ülevaade energiasalvestistest ja nende põhiparameetritest. Teises osas antakse ülevaade kondensaatorite ajaloost ning ülikondensaatori ehitusest, omadustest ja kasutusvaldkondadest ning suurimatest tootjatest. Kolmandas osas projekteeriti skeem programmis Circuit wizard ja testiti selles programmis skeemi toimivust. Kuna antud programmis oli kasutusel elektrolüütkondensaator, siis ei saanud hinnata üks ühele täituvust ja tühjenemist võrreldes ülikondensaatoriga. Sellest tingitult koostati vastavalt programmis valminud skeemile reaalselt valmis katsestend, kus katse käib reaalse ülikondensaatoriga. Käesolevas töös on ülevaade ka katsestendi ehitusest, kirjeldatud katsestendi tööpõhimõtet, töö autori poolt on koostatud mõõtmised ja mõõtmiste põhjal on autor teinud omad järeldused. Samuti on tabelina välja toodud katsestendi ehituseks vajalikud komponendid koos hindadega. Viimases osas on lõputöö autori poolt välja mõeldud laboratoorne töö. Laboratoorse töö lahendamiseks vajalikud mõõtmised toimuvad lõputöös valmistatud katsestendiga.

1. ENERGIASALVESTID

1.1. Energiasalvestite liigid

Energiasalvestussüsteemid pakuvad meie energiavarustuse haldamisel laias valikus tehnoloogilisi lähenemisviise, et luua vastupidavam energიაinfrastruktuur ja võimaldada kulude kokkuhoidu nii kommunaalteenustele kuid ka tarbijatele [2].

Õigesti valitud salvestustehnoloogia aitab siluda elektrisüsteemi koormusgraafikut ning aitab optimeerida tootmisseadmete tööd. Joonisel 1.1 on näha kuidas jagunevad elektrisalvestid [1].



Joonis 1.1. Elektrisalvestite liigid [1].

Nagu joonisel 1.1. näha jagunevad energiasalvestid viide alamkategoriasse ehk mehaaniliseks, elektrokeemiliseks, keemiliseks, elektriliseks ja soojuslikuks.

1.2. Energiasalvestite eesmärgid

Energiasalvestustehnoloogiad võimaldavad laiendada elektrisüsteemide võimalusi ja jõudlust katmaks elektrivõrkude lühi- ja pikaajalisi vajadusi. Suure võimsuse ja

energiamahutavusega salvestid võimaldavad ühtlustada ööpäevast elektritootmist, sealhulgas parandades ka kasutegurit. [1]

Energiasalvestite kasutamise põhilisteks eesmärkideks on [1]:

- 1) tootmise ja tarbimise ühildamine;
- 2) toitekatkestusest tulenevate riskide vähendamine;
- 3) juhuslikku laadi taastuvenergiaallikate integreerimise võimaldamine;
- 4) elektrikvaliteedi tagamine.

1.3. Energiasalvestite parameetrid

Energiasalvestitel on sõltuvalt tüübist erinevad parameetrid ja tunnused, kuid igat salvestusmoodust iseloomustavad teatud põhiparameetrid mis võimaldab hinnata nende sobivust konkreetse ülesande täitmiseks [1].

Allpool on välja toodud energiasalvestite põhiparameetrid [1]:

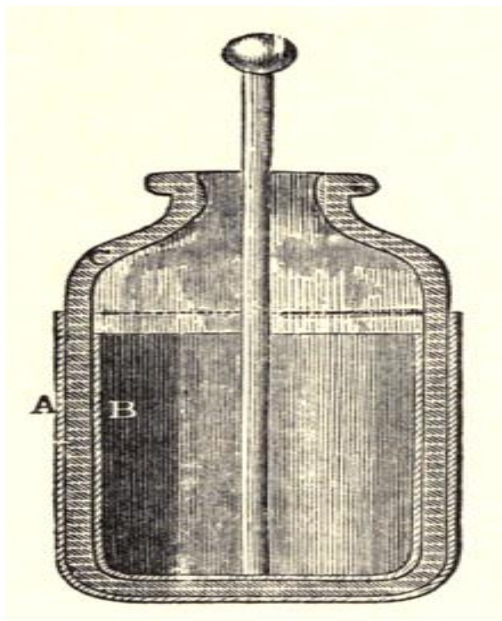
- 1) Ühikvõimsus – salvestatud energia maksimaalne võimsus mida seade annab võrku Tagasi;
- 2) Energiamahutavus ehk salvestusvõime – salvestusseadmete kogu energiahulk, mida on võimalik reaalselt kasutada;
- 3) Kasutegur – näitab maksimaalset võimalikku energiakogust mida seade välja annab selle tühjaks laadimisel;
- 4) Töotsükli kogukasutegur – näitab seadmest kättesaadavat elektrikogust suhtena seadmesse ühe tsükli jooksul salvestatud ja tühjaks laetud elektri kogusesse;
- 5) Reageerimiskiirus – aeg, mille jooksul seade hakkab oote- või salvestusrežiimist energiat võrku tagasi andma;
- 6) Eluiga – seadme eluiga mõõdetakse tsüklites, tundides või ajaühikutes. Tsükli seadme eluea jooksul laadimis-tühjenemistsüklite suurim arv;
- 7) Elektrikvaliteet – seadme võime tagada kvaliteetset ja pidevat katkestuseta elektrit, ning tulla toime ka kvaliteediprobleemidega;
- 8) Erivõimsus – kasutatava võimsuse suhe energiasalvesti massi või ruumalasse;
- 9) Erienergia – kasutatava energia suhe energiasalvesti massi või ruumalasse.

2. ÜLIKONDENSAATOR

2.1. Ajalugu

Filosoof Thales of Miletus avastas elektrilaengud kui ta riidega merevaiku hõõrus ja täheldas osakeste magnetilist külgetõmmet. Sellest ajast alates on kahe mittejuhtiva materjali laengu tekitamiseks kokku hõõrumist käsitletud triboelektrilise efektina [3].

Kondensaatori lihtsaim ja varaseim vorm elektrilaengu hoidmiseks oli Leideni purk. 1745. aastal Leideni purgi omadused avastas Pieter van Musschenbroek ja natukene aega hiljem avastas sama seadme iseseisvalt ka Ewald Georg von Kleist [4].



Joonis 2.1. Leideni purk [4].

Esimeses kondensaatoris oli määrav laengu eraldamisel ja laengu hoidmisel kaks olulist tegurit: dielektriku paksus ja juhtivate materjalide pindala. Kondensaator koosnes klaasanumast, mille sisemine ja välimine osa olid kaetud omavahel ühendamata fooliumiga. Purgi isoleeritud korki läbib juhtvarras, mis on ühendatud põhjast sisemise fooliumiga. Fooliumribad toimisid elektroodidena ja purk dielektrikuna. [3, 4]

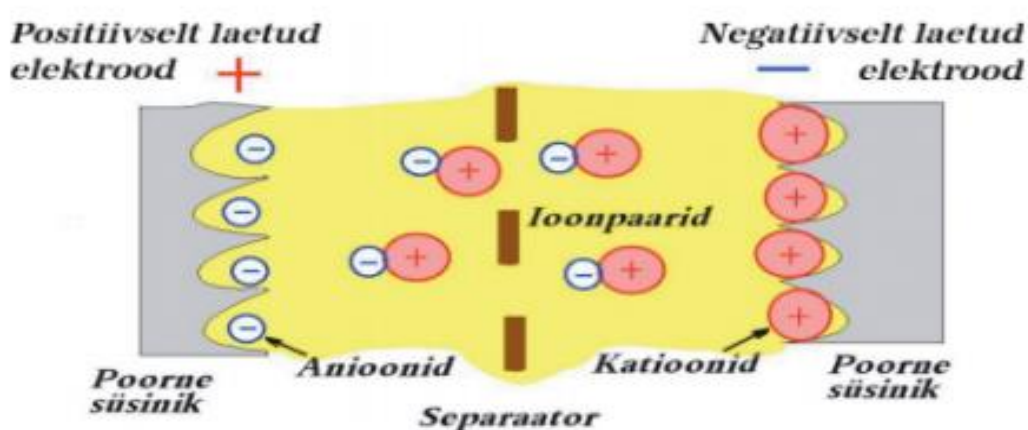
Esimene elektrokeemiline kondensaator oli patenteerinud General Electric's H.I.Becker aastal 1957. Kuigi selle seadmega kasutati kahekihilist laengut, oli see ebapraktiline kuna oli vaja sukelduda elektrolüütide kogumisse. [5]

Materjalide ja tootmise tehnoloogilise arenguga arenesid kondensaatorid kaasaegseteks seadmeteks, mida nüüd kasutatakse elektrisüsteemides [3].

2.2. Ülikondensaatori olemus ja ehitus

Ülikondensaator on seade elektrienergia salvestamiseks [6]. Ülikondensaatori kolm põhielementi on sepaator, elektrolüüt ja elektroodid ning nende omadused täiendavad ainulaadselt ülikondensaatori üldist jõudlust. Dielektriline tugevus, keemiline inertsus, poorsus (iooni läbilaskev) ja väike paksus on sepaatori puhul olulisemad nõudeid ülikondensaatori efektiivseks tööks. Elektroodid peavad olema ka väga poorsed, suurima võimaliku eripinnaga, väikese elektritakistusega ja kõrge keemilise stabiilsusega. [7]

Ülikondensaatorid on valmistatud süsinikust, mille ülisuure aktiivpinna tõttu on võimalik saavutada mahutavusi, mis ulatuvad faraditest kuni tuhandete faraditeni. Ülikondensaatori tööpõhimõte seisneb laadimis- ja tühjendamistsükli ajal elektrilaengute adsorbeerimisel ja desorbeerimisel. [1] Joonisel 2.2. on kujutatud ülikondensaatori tööpõhimõtet.



Joonis 2.2. Ülikondensaatori tööpõhimõte [1].

Ülikondensaator koosneb negatiivsest ja positiivsest elektroodist, mille välimistele külgedele on ühendatud voolukogujad ehk kollektorid ja sisekülgi eraldab sepaator. Kogu

süsteem on impregneeritud (immutatud) sobiva elektrolüüdiga ning on suletud korpusesse. Elektrolüüdina kasutatakse vesilahusel või mittevesilahusel baseeruvaid orgaanilisi ehk aprotoonseid elektroode. Ülikondensaatori tööpõhimõte seisneb selles, et laadimisel ülikondensaatori elektrolüüdi positiivselt laetud ioonid ehk katioonid liiguvad negatiivselt laetud elektroodile, tekitades sellega elektroodi pinnal positiivsete laengute kihi. Anioonid ehk negatiivselt laetud ioonid liiguvad omakorda positiivselt laetud elektroodile, tekitades sellel pinnal negatiivsete laengute kihi. Süsiniku poorid toimivad seal laengu säilitajatena. Voolukollektoririte kaudu kogutakse laengud elektroodi pinnalt kokku ning juhul kui välisahelas ühendada + ja – kokku toimub ülikondensaatori tühjakslaadimine mille tõttu ioonid liiguvad tagasi lahusesse. Kuna orgaaniliste elektrolüütide läbilöögipinge väärtuseks on ligikaudu 3,2 V, siis ülikondensaatorite puhul suurimaks kasutatavaks pingeks on 2,85 V. Ülikondensaatori eluea pikendamise huvides määratakse pingeks kuni 2,7 V. [1]

2.3. Ülikondensaatori omadused

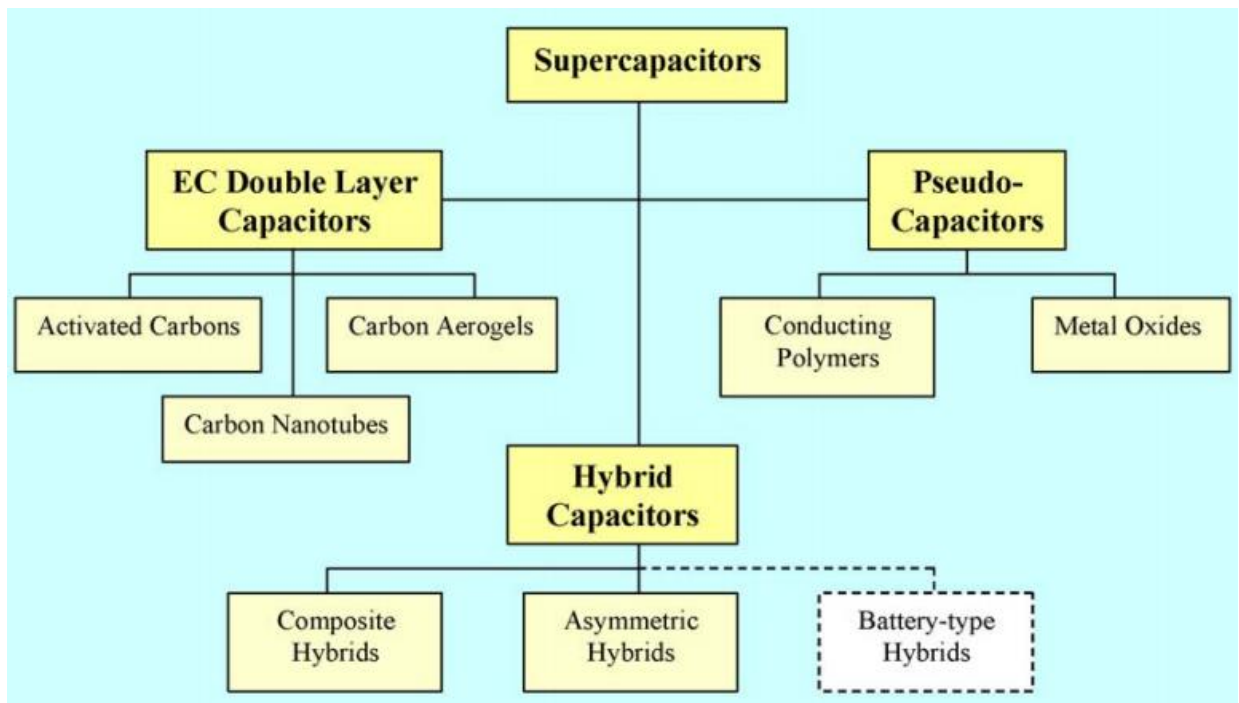
Ülikondensaatorid ühendavad akude energiasalvestusomadusi kondensaatorite tühjenemisomadustega. Energiatihenduse saavutamiseks sisaldavad need elektroode, mis koosnevad väga suure pindalaga aktiivsöest ja molekulipaksusega elektrolüüdikihiga. Kuna kondensaatoritesse salvestatav energiahulk on proportsionaalne elektroodi pindalaga ja pöördvõrdeline elektroodi ja elektrolüüdi vahelise vahega, on superkondensaatorite energiatihedus äärmiselt kõrge. Seetõttu suudavad nad hoida väga suurt elektrilaengut. Suur võimsustihedus tuleneb asjaolust, et energiat salvestatakse staatilise laenguga. Erinevalt akust pole ülikondensaatori laadimiseks või tühjenemiseks vaja keemilist reaktsiooni, nii et seda saab laadida ja tühjendada väga kiiresti (millisekundites). Ja erinevalt akust, kuna keemilisi reaktsioone ei toimu, on ülikondensaatori laadimis-tühjenemistsükli eluiga peaaegu piiramatult. [8]

Ülikondensaatoreid iseloomustab madal hooldusvajadus, pikk eluiga ning kõrged laadimis- ja tühjendamisvoolud. Kuna ülikondensaatoril on väiksed lekkevoolud, siis see võimaldab salvestada energiat pika aja vältel. [1]

Laadimis-tühjenemistsükklite arv võrreldes akudega on väga suur ($>1\,000\,000$) samas esineb kondensaatoritel ka vananemine ehk mahtuvuse vähenemine mis on sõltuvuses temperatuurist ja rakendatud pingest [1].

2.4. Jagunemine

Ülikondensaator kasutab elektrienergia salvestamiseks kahte põhiprintsiipi ehk pseudokondensaatorid ja staatilist kahekihilist mahtuvust. Selle põhjal liigitatakse ülikondensaatorid kolme eri tüüpi (joonis 2.3). [9]



Joonis 2.3. Ülikondensaatori jagunemine [10].

Nagu joonisel 2.3 näha siis ülikondensaatorid jaotatakse omadustelt kolme erinevasse alamkategooriasse. Järgnevalt ongi kirjeldatud laiemalt elektrilist kahekihilist kondensaatorit, pseudokondensaatorit ja hübriidkondensaatorit.

2.4.1. Elektriline kahekihiline kondensaator

Elektriline kahekihiline kondensaator on elektrokeemiline kondensaator, mis koosneb kahest poorsest juhtivast elektroodist, mis on sukeldatud elektrolüüti ja eraldatud separaatoriga. Iga elektrood moodustab elektrolüüdi ioonide kihiga kondensaatori. Energia salvestamise protsessid on puhas elektriline protsess, millel jooksul ei toimu elektrokeemilisi reaktsioone. [11]

EDLC on kõige levinumad müügil olevad ülikondensaatoreid, kus laeng ladustatakse elektrostaatiliselt või mitte faradaalselt, kasutades topeltkihti (Helmholtzi kiht), milles laeng akumuleerub elektroodi pinnale, järgides separaatori pooridesse hajutatud erinevate laengute loomulikku tõmmet [7].

Elektroodid on valmistatud aktiivsöest või selliste derivaatidega, millel on suurem elektrostaatiline kahekihiline mahtuvus kui elektrokeemilistel elektroodidel [9].

2.4.2. Pseudokondensaator

Pseudokondensaator on energiasalvestusseade, mis põhineb energia salvestamisel elektroodi laengu ülekandmise reaktsioonil elektroodi – elektrolüüdi pinnale. Põhimõtteliselt on pseudokondenssaator väga sarnane laetavate elektrokeemiliste patareidega. Pseudokondensaatorid on erilise energia poolest paremad kui kahekihilised elektrilised kondensaatorid, kui erivõimsuse poolest halvemad. [11]

2.4.3. Hübriidkondensaator

Elektrilise kahekihilise kondensaatori ja pseudokondensaatori kombinatsiooni kutsutakse hübriidkondenssaatoriks. Kombineerides need kaks energiasalvestustehnoloogiat üheks seadmeks, on võimalik saavutada mõõdukas spetsiifiline energia ja võimsus. [11]

2.5. Ülikondensaatori kasutusvaldkonnad

Tänu oma kiirele laadimis- ja tühjenemistsükklile ning ülipika eluea tõttu on ülikondensaatoritega võimalik asendada väiksemaid elektrikvaliteedi tagamise tehnoloogiaid võimsusega kuni 250 kW. Ülikondensaatoreid kasutatakse rakendustes, kus lühikese ajaperioodi jooksul on tarvis suuri võimsusi. [1]

Kuna ülikondensaatoritel on ka veel lai töötemperatuuri vahemik siis see võimaldab kasutada ülikondensaatoreid erinevates kasutustingimustes. Ülikondensaatorid on kasutusel jõuelektroonikas, mälukaitse, aku täiustamiseks, kaasaskantavatel, võimsuse kvaliteedi parandamiseks, reguleeritava kiirusega ajamites, hübriid sõidukites, taastusenergia salvestus seadmetes ning sõjaväe- ja kosmoseseadmetes. [3]

2.5.1. Ülikondensaatori rakendamine hübriid elektriautodes

Ülikondensaatoreid kasutatakse hübriid elektriautode efektiivsuse parandamiseks. Tänapäeva hübriidsõidukid lülitavad mootori tavaliselt lühiajaliselt seisma jäädes välja ja seejärel kui vaja auto uuesti käivitada kasutatakse ülikondensaatoritesse salvestatud energiat. [12]

Päiksesepatareisüsteemis on hübriidenergia salvestussüsteem loodud kombineerides ülikondensaatorit akuga, et suurendada süsteemi energiatihendust. Sellel süsteemil on rohkem eeliseid kui ülikondensaatori või aku individuaalsel kasutamisel. Patareide (akude) koormust saab vähendada ülikondensaatorite ja akude hübriidsüsteemi abil. Hübriidsüsteemi kasutus ja hoolduskulud on väiksemad, kuna see vähendab aku suurust ja tühjenemiskiirust ning suurendab seetõttu aku kasutusaega. Hübriidsüsteem parandab ka energia kvaliteeti. Ülikondensaatoris olev energia salvestatakse füüsiliselt eraldatud negatiivsesse ja positiivsesse laengusse. Ülikondensaator toimib puhvrina, kui seda kasutatakse koos akuga. Sel moel kaitseb see akut suure elektrivõimsuse eest. Ülikondensaatoritel on väga pikk elutsükkel, suur võimsustihedus, kiire laadimisaeg ja vähem samaväärne sistakistus. Nende eeliste tõttu on ülikondensaatorid paljudes rakendustes akud juba välja vahetanud. Kuna aku energiatihedus on suur ja ülikondensaatoril on suur võimsustihedus, siis nende mõlema koosmõjul saab ideaalse hübriidsüsteemi. Tippvõimsuse korral võimaldab ülikondensaatori

suur võimsustihedus piisavat energiavarustust lühikese aja jooksul. Ülikondensaatori saab pärast tühjenemist kiiresti laadida. Teiselt poolt annab aku suure energiatiheduse tõttu pika aja jooksul laadimiseks pidevalt energiat. Ülikondensaatorid võivad ka aku suurust vähendada, kuna tipphetkel annab energiat ülikondensaator, mistõttu pole vaja tippkoormuse nõuete täitmiseks suurt akut. Aku eluiga pikeneb ka seetõttu, et akut ei tühjendata sageli. Seetõttu vähendab ülikondensaatori lisamine süsteemi käitamise ja hooldamise kulusid. [12]

2.5.2. Ülikondensaator tuuleenergeetikas

Tuuleenergeetika on üks kiiremini arenevaid taastuvenergia tootmise tehnoloogiaid. Kuid tuuleenergia on ka üks ettearvamatumaid primaar energiaallikaid, sest see on suures sõltuvuses muutuvast tuulekiirusest. Tuule kiirus omakorda mõjutab võrgu võimsuse kvaliteeti kuna see põhjustab kõikumisi turbiinide väljundvõimsuses. Kaasaegsetel tuuleturbiinidel on aktiivse võimsuse kõikumise kõrvaldamiseks otse reguleeritavad rootorid. See ühtlustab väljundvõimsust, kuid pakub võimsuse reguleerimiseks piiratud võimalusi. Süsteemi reaktiivvõimsuse kõikumine eemaldatakse võimsuse kompenseerimise seadme abil. Kuid aktiiv võimsuse kõikumisi ei saa võimsuse kompenseerimise seadme abil stabiliseerida. [12]

Tuuleparkide pinget saab stabiliseerida energiasalvestite abil. Aktiiv- ja reaktiivvõimsust on võimalik reguleerida ka salvestusseadme lisamise teel. Uuringud näitavad, et võrgu võimsuse kvaliteeti mõjutab tugevalt kõikuv võimsus 0.01-1 Hz juures. Lühiajalist salvestusseadet saab kasutada tuuleenergia kõikumise pärssimiseks selles sagedusalas. Seetõttu on salvestusseadmel, mis suudavad oma energiat lühikese aja jooksul realiseerida, tuuleenergiast palju rakendusi. [12]

Suure voolu kõikumise lahendamiseks saab tuuleelektrijaamades kasutada ülikondensaatoreid. See sobib kõige paremini nende suure voolu laengu ja tühjenemise omaduste tõttu. Ülikondensaatorite pikk eluiga muudab need ideaalseks võimaluseks ka tuuleenergeetikas kasutamiseks. Energia salvestub ülikondensaatorisse, kui tuule kiirus on suur. Kui tuule kiirus kõigub, hakkab ülikondensaator tühjenema, et süsteemi väljundvõimsust tasandada, võimaldades tõhusamat võrgusüsteemi. [12]

2.5.3. Ülikondensaator päikeseenergeetikas

Päikesepaneelide süsteemides on akud laialdaselt kasutusel elektrienergia salvestamiseks. Akude jõudlus ja eluiga on sõltuvuses laadimis- ja tühjendustsüklite arvust. Ilmastikuolude kõikumine põhjustab akude laadumist ja tühjendamist üsna sageli, mis vähendab nende tööiga ja suurendab hoolduskulusid. [13]

Sellepärast kasutatakse ülikondensaatorit päikeseenergeetikas akude tööea pikendamiseks ning ülikondensaatori kasutamine vähendab ka hoolduskulusid. [14]

2.6. Ülikondensaatori tootjad

Maailmas on väga palju ülikondensaatorite tootjaid aga ühed suurimatest on Maxwell Technologies ja Skeleton Technologies [15].

Lõputöö autor kirjeldab pisut laiemalt kahte tootjat, üks tootja on eesti ettevõtte ja teise tootja ülikondensaatorit on kasutatud ka selle lõputöö katsestendi ehitusel.

2.6.1. Maxwell Technologies

Maxwell Technologies oli ülikondensaatori projekteerimise, arendamise ja kasutuselevõtu eestvedaja. Maxwell on hinnatud ülemaailmselt ning üle maailma on paigaldatud enam kui 65 miljonit Maxwelli ülikondensaatorit nii mobiilsetesse ja statsionaarsetesse rakendustesse. Maxwelli ülikondensaatorid on jaotatud vastaval omadustele ja kasutusvaldkondadele kolmeks: Standard series, XP series ja DuraBlue. [16] Katsestendis on kasutatud Standard series ülikondensaatorit.

2.6.2. Skeleton Technologies

Skeleton Technologies asutati 2009. aastal. Ettevõtte alustas 2009. aastal grafeenil põhinevat ülikondensaatorite arendamist. Tänapäevaks esindavad Skeletoni patenteeritud „kumera

grafeeni“ baasil olevad SkelCap ülikondensaatorid tööstuse viimase 20 aasta suurimat tehnoloogilist arengut. [17]

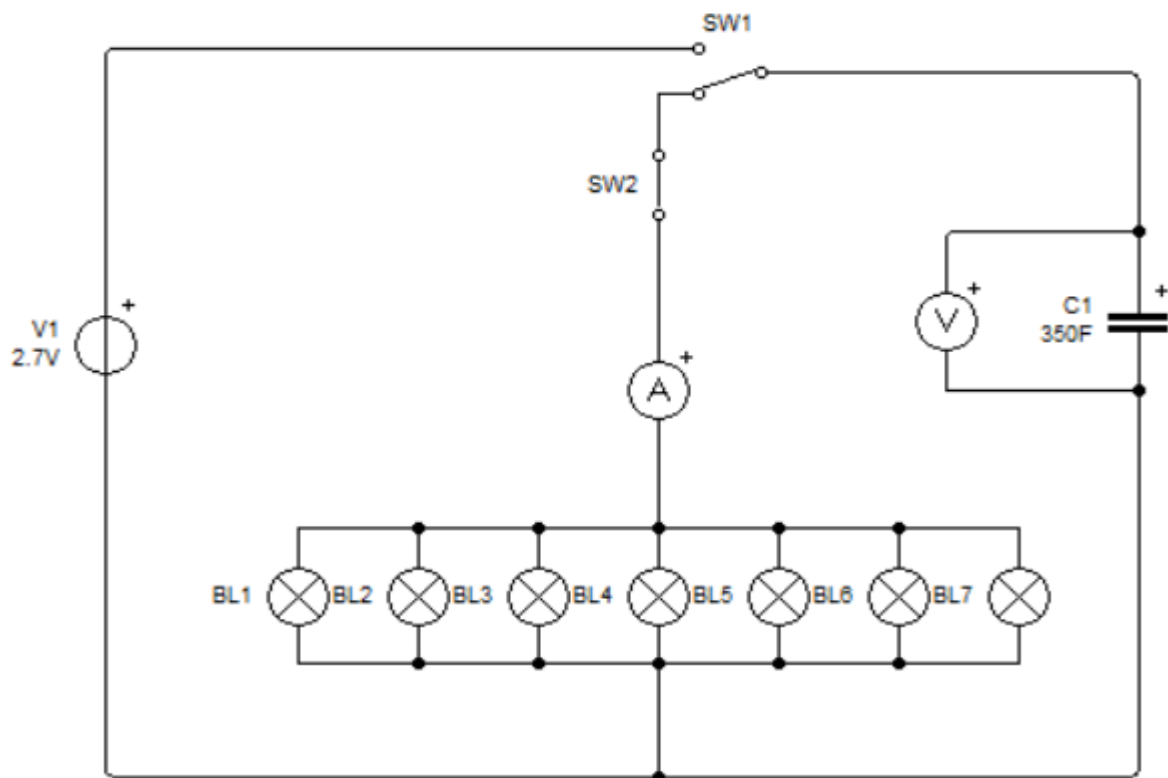
3. KATSESTENDI KOOSTAMINE JA KATSETAMINE

3.1. Katsestendi eesmärk

Katsestendi väljatöötamisel lõputöö autor konsulteeris juhendajaga mida üldse katsestend tegema peaks. Arutelul juhendajaga sai seatud paika katsestendi eesmärgid, et oleks võimalik juhtida ülikondensaatori täitumist ning oleks võimalik laadida ülikondensaatorit nii palju kui vaja ja ka tühjendada nii palju kui vaja. Samuti katsestendil pidi olema võimalik näha või ka mõõta voolusid ja pingeid. Kuna katsestendi eesmärk on kasutada seda laboratoorses töös, siis lõputöö autor otsustas ehitada katsestend selliselt, et laboratoorses töös esmalt peaks vastavalt skeemile katsestendi kokku ühendama ja seejärel tuleks teha vastavalt labori juhendile vajalikud mõõtmised.

3.2. Katsestendi projekteerimine

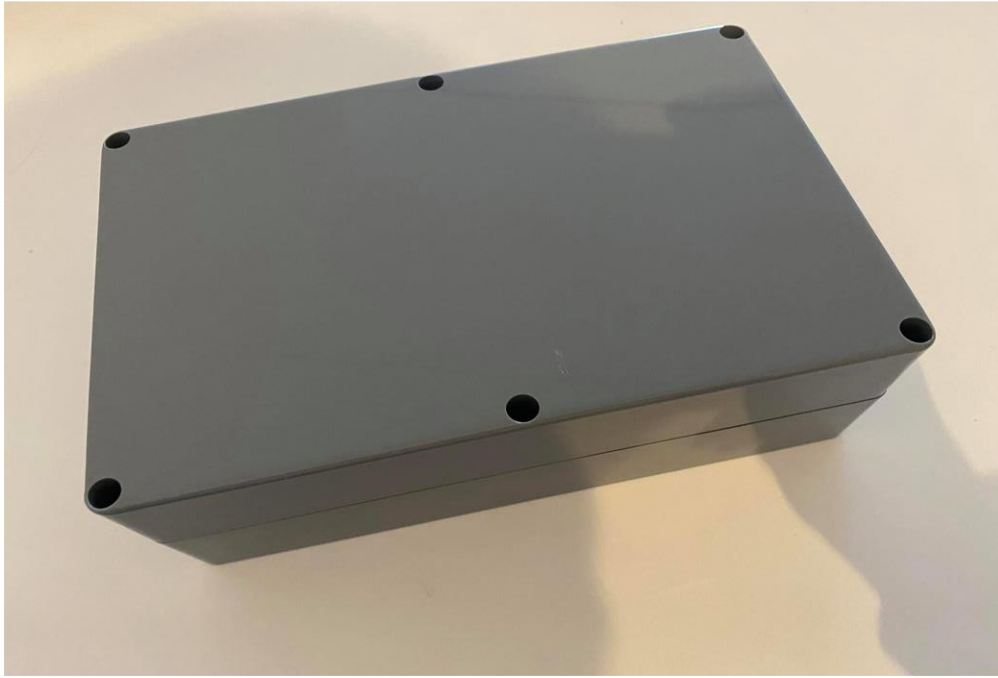
Katsestendi projekteerimise faasis kasutas autor programmi Circuit wizard, millega koostati ja testiti skeemi toimimist. Kuna antud programmis oli kasutusel tavaline kondensaator ja elektrolüüt-kondensaator, siis selles programmis kasutas autor elektrolüüt-kondensaatorit projekteerimiseks ja testimiseks. Kuna elektrolüüt-kondensaatori puhul ei saanud hinnata täitumist ja tühjenemist sarnaselt ülikondensaatorile, siis ei saanud testida seda kui kaua täituks ja tühjeneks ülikondensaator. Sellest tingitult autor otsustas programmis koostatud skeemi põhjal siiski reaalselt valmis koostada katsestendi. Antud programmiga on võimalik koostada skeeme ning simuleerida skeemi toimimist. Samuti on võimalik genereerida graafikuid, näiteks kondensaatori täituvust aja suhtes. Programmiga koostati algne skeem (joonis 3.1).



Joonis 3.1. Katsestendi ühendusskeem: V1-toiteallikas; SW1-lüliti; SW2-lüliti; A-ampermeeter; V-voltmeeter; C1-ülikondensaator; BL1 - BL7-Hõõglambid (autori koostatud).

3.3. Katsestendi konstrueerimine

Katsestendi konstrueerimisel lõputöö autor lähtus seatud eesmärkidest, ehk katsestendi peaks saama kokku ja lahti ühendada ning võiks olla võimalikult kompaktne. Seatud eesmärkidest lähtuvalt valiti välja karp kuhu sisse ehitati katsestend. Karpi valides välditi metallist karpe kuna need on liiga head elektrijuhid. Karbiks valiti oomipoes müüdav plastikarp (joonis 3.2.) mis on ka veekindel.



Joonis 3.2. Katsestendi karp.

Karbi mõõtmed on: pikkus 222 mm, laius 146 mm ja kõrgus 75 mm. Lõputöö autor siiski päris veekindlaks katsestendi ei ehitanud, ehk ei tihendatud silikooniga karbi kaanel paikevaid komponente, kuna katsestendi eesmärk on kasutada seda laboris ja laborisse on üldjuhul vedelikuga sisenemine keelatud. Esmalt paigaldati katsestendi karbile kaks banaani pistiku pesa. Pluss kaabel läheb katsestendil punasesse pessa ja miinus läheb vastavalt musta pessa.

Kuna eesmärk oli katsestend koostada nii, et seda saaks iga laboratoorse töö jooksul uuesti kokku ja lahti ühendada siis juhtmete kinnitamiseks sai valitud maketeerimislaud. (joonis 3.3).



Joonis 3.3. Maketeerimislaud.

Maketeerimislaua mõõtmed on 176 mm pikkus ja laius 46 mm, mis on ka täiesti piisav suurus antud katsestendi jaoks. Maketeerimislaud kinnitati nelja kruviga karbi põhja. Energiasalvestiks valiti Maxwell tootja ülikondensaator, mille põhiparameetrid on välja toodud tabelis 3.1.

Tabel 3.1. Ülikondensaatori parameetrid [18]

Mahutavus	350 F
Tööpinge	2,7 V
Lekkevool 25 °C juures	0.30 mA
Töötemperatuuri vahemik	-40 °C...70 °C
Energia mahutavus	0,35 Wh
Laadimistsüklite arv	500 000
Mass	60 g
Maksimaalne vool	170 A
Sisemine takistus	3,2 mΩ



Joonis 3.4. Ülikondensaator.

Joonisel 3.4 on kujutatud katsestendis kasutatud ülikondensaator. Antud ülikondensaator kinnitati kahepoolse teibiga karbi põhja ja külje külge, et vajaduse korral oleks ka võimalik ülikondensaator sealt eemaldada või välja vahetada. Ülikondensaatori valikul lähtuti autori hinnangul tulumast tootjast, siis on üha kindlam, et hinnast tellides jõuab kohale ka õige asi. Nagu joonisel 3.4 on näha, siis skeemi koostamisel on kasutatud spetsiaalseid maketeerimislauda juhtmeid. Nende juhtmetega on võimalik skeemi kokku panna ja lahti võtta, mis on ka antud hetkel laboratoorse töö üks ülesannetest. Katsestendile lisati ka mehaaniline voltmeeter ja ampermeeter (joonis 3.5).



Joonis 3.5. Katsestendil olev ampermeeter ja voltmeeter.

Voltmeeter ja ampermeeter lisati, et oleks kohene ülevaade kui täis laetud on ülikondensaator ja ampermeeter näitaks ülikondensaatori tühjenemisel voolu. Katsestendi kaanele lisati voltmeetri ja ampermeetri alla ka pistikud, et saaks multimeetriga mõõta täpsemaid tulemusi ning kasutada neid laboratoorses töös, kuna mehaanilistelt näidikutelt on raske täpset numbrit välja lugeda.

Nagu joonisel 3.6. on näha, siis toiteallikaks katsestendile on sarnaselt laborile toiteplokk, mille väljundpinget on võimalik muuta vahemikus 0 - 30 V ja väljundvoolu on võimalik muuta vahemikus 0 – 5 A. Toiteploki tootja on Wanptek ja mudeli nimetus on KPS305D. Töö autor pidi valmistama ise ka juhtmed mis ühenduksid toiteploki katsestendi, kuna selliseid juhtmeid, kus mõlemas otsas on banaani pistik antud hetkel poes müügil ei olnud.



Joonis 3.6. Katsestend

Joonisel 3.6 on näha ka katsestendi tühjenemisahela tarbijad ehk seitse hõõglampi. Algselt testiti katsestendi ühe hõõglambiga kuna tühjenemine osutus ühe hõõglambiga liiga pikaks protsessiks, siis töö autor otsustas lisada skeemi hõõglampe rohkem. Algselt töö autoril oli plaan panna kõik ühesugused hõõglambid, kuna poes polnud saada ühesuguseid nii palju kui oli vaja, siis sai võetud vastu jooksvalt otsus, kus neli hõõglampi on ühesuguste näitajatega (tabel 3.2), siis kaks hõõglampi oli vähe suurema pingega ja vähe suurema võimsusega (tabel 3.3) ning üks hõõglamp sai võetud prooviks kõige suurema pingega ja võimsusega (tabel 3.4).

Tabel 3.2. Hõõglambi parameetrid [19]

Lambi tüüp	E10 lamp
Tehnoloogia	Hõõglamp
Pinge	2,2 V
Võimsus	0,55 W
Vool	250 mA
Värv	Valge

Tabel 3.3. Hõõglambi parameetrid [20]

Lambi tüüp	P13.5S
Tehnoloogia	Hõõglamp
Pinge	2,4 V
Võimsus	1.7 W
Vool	700 mA
Värv	Valge

Tabel 3.4. Hõõglambi parameetrid [21]

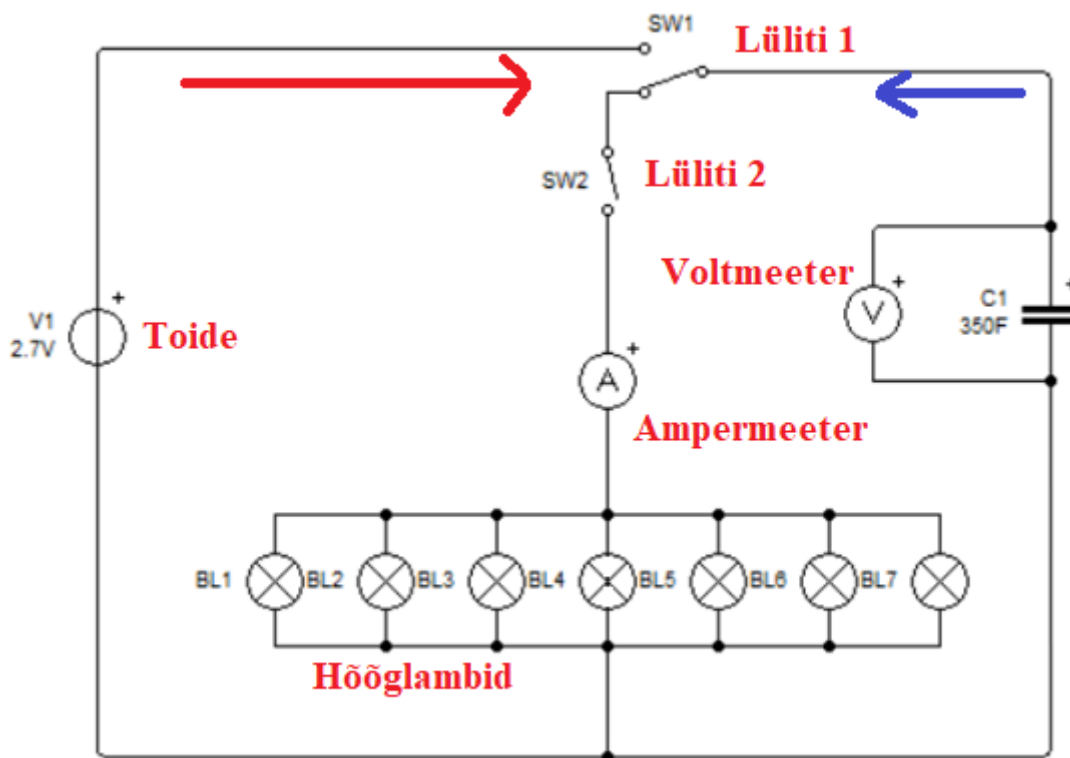
Lambi tüüp	P13.5S
Tehnoloogia	Hõõglamp
Pinge	6 V
Võimsus	3 W
Vool	500 mA
Värv	Valge

Põhjus miks laboratoorses töös kasutati just sellise pingega hõõglampe oli see, et siis oleks reaalselt ka näha mille arvelt ülikondensaator tühjenema hakkab. Näiteks 6 V hõõglambiga on juba näha, juhul kui ülikondensaator on laetud siis 6V hõõglamp kõigest hõõgub õrnalt, kuna ülikondensaator annab välja 2,7 V. Kuna ainult neljal hõõglambil oli olemas lambipesa ja ülejäänud kolmel lambipesa polnud, siis sellest tingitult lõputöö autor otsustas kõik

hõõglambid kinnitada katsestendi kaane külge hermeetikuga. Sellisel juhul oleks võimalik vajadusel ka kõiki hõõglampe välja vahetada.

3.4. Katsestendi tööpõhimõte

Katsestendi üheks eesmärgiks on laadida kondensaatorit nii palju kui vaja ja tühjendada kondensaatorit nii palju kui võimalik. Joonisel 3.7 on toodud kõik katsestendi komponendid.



Joonis 3.7. Katsestendi skeem.

Katsestendi lisati kaks klahvlüliti, vastavalt joonis 3.7. lisati lüliti 1 ja lüliti 2. Lüliti 1 on klahvlüliti, mille tunnus on ON-ON ehk klahvlüliti on kolm klemmi. Klahvlüliti eesmärk on skeemis ümber lülitada ühelt ahelalt teisele ehk ülikondensaatori laadimise ahelalt ülikondensaatori tühjenemise ahelale ja samas ta täidab ka funktsiooni kus piirab ära toiteploktist tuleva voolu. See annab võimaluse peatada ülikondensaatori laadimist ja samas kui skeemis olev lüliti 2 on samuti välja lülitatud asendis ei toimu ka ülikondensaatori tühjenemist. Sellise lahendusega annab ülikondensaatorit laadida täpselt nii palju kui vaja. Lüliti 2 on samuti klahvlüliti mille tunnus on ON-OFF ehk klahvlüliti on 2 klemmi. Lüliti 2 eesmärk katsestendis on lülitada sisse ja välja ülikondensaatori tühjenemine mis võimaldab

kontrollida ülikondensaatori tühjenemist ning tühjendada ülikondensaatorit täpselt nii palju kui vaja. Ampermeeter näitab tühjenemise ahela voolu. Voltmeeter näitab ülikondensaatori täituvust, kuna ülikondensaatori nimipinge on 2.7 V, siis oleks ka oluline, et toiteplokist määrataks selline pinge. Ülikondensaatorit saab lugeda täitunuks kui toiteplokil on vool langenud nulli ja voltmeetril on näit 2.7 V. Kuna ülikondensaator vajab tühjenemiseks ka tarbijat, siis valiti tarbijaks hõõglambid ja hõõglambid on ühendatud rööbiti. Skeemil on näidatud ka punane nool ja sinine nool. Punane nool näitab elektrivoolu suunda ülikondensaatori täitumisel. Sinine nool näitab elektrivoolu suunda ülikondensaatori tühjenemisel.

3.5. Katseendi komponendid

Katseendi komponendid koos hindadega on näidatud tabelis 3.5. Katseendi ehitus läks kokku maksma orienteeruvalt 120 eurot.

Tabel 3.5. Katseendi ehituseks kasutatud komponendid [19-28]

	Komponent	Tüüp	Tarnija, tootekood	Kogus	Hind
V1	Toiteplokk	DC Power Supply, 0-30V, 0-5 A	Wanptek, KPS305D	1	60
-	Karp	Veekindel plastikkarp, 75x146x222mm	Oomipood, BOX G353	1	15
BL4 – BL7	Hõõglamp	Lamp 2.2 V, 250 mA, 0.55 W	Oomipood, LAMP 522	4	3,20
BL2 – BL3	Hõõglamp	Lamp 2.4 V, 700 mA, 1,7 W	Oomipood, KPR102	2	3
BL1	Hõõglamp	Lamp 6 V, 500mA, 3 W	Oomipood, ASWO-91761	1	1,50
V	Voltmeeter	15 V DC, 70x60 mm	Oomipood, AVM7015	1	10,50
A	Ampermeeter	5 A DC, 45x45 mm	Oomipood, MIE2130	1	6,00
-	Maketeerimislaud	176x46 mm, 700 punkti	Oomipood, PPS0700	1	2,50
-	Maketeerimislaua juhtmed	Isa – isa, 15 cm	Oomipood	40	10
SW2	Klahvlüliti	12 V, 15 A, ON - OFF	Oomipood, MIRS101-3D2/GR	1	1,50
SW1	Klahvlüliti	250 V, 6 A, ON – ON.	Oomipood, MRS102-AC3	1	1
C1	Ülikondensaator	350 F, 2.7 V	Aliexpress, BCAP0350	1	6

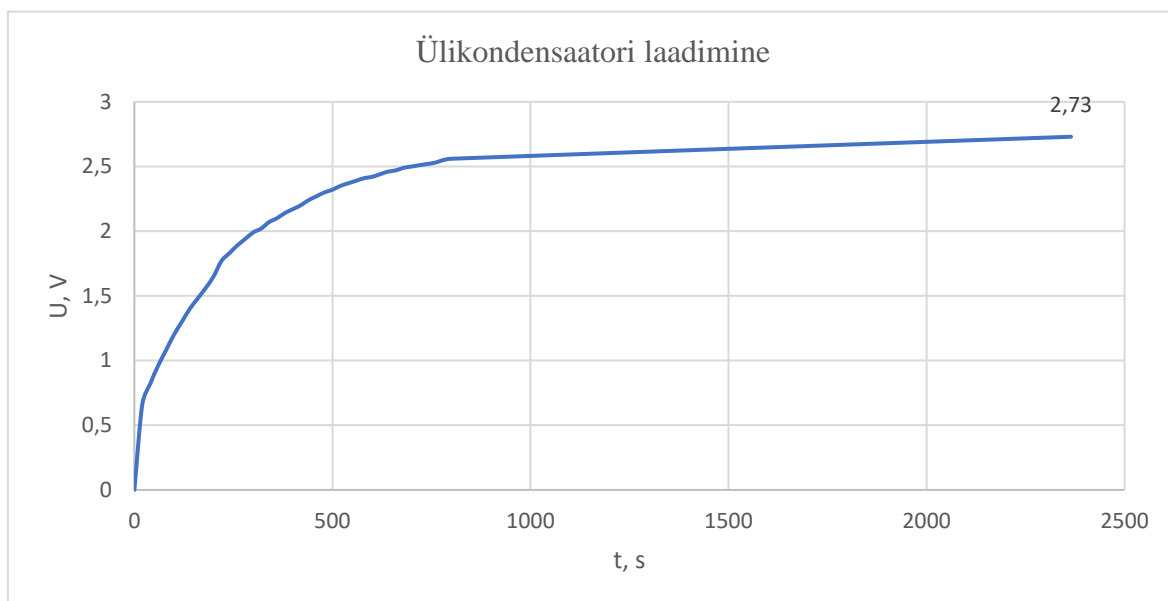
3.6. Läbi viidavate katsete kirjeldus, tulemused ja järeldus

Töö autor viis läbi katsetused katsestendiga, esmalt proovis kui kaua kulub aega kondensaatori laadimiseks. Aja mõõtmiseks kasutati stopperit ja näidud igal ajahetkel fikseeris autor pildistamisega. Nagu joonisel 3.9 on näha, siis näitude fikseerimiseks kasutati multimeetrit, sest multimeetri järgi on võimalik saada tunduvalt täpsemalt kui katsestendil asuvalt voltmeetrilt.



Joonis 3.8. Katsete teostamine.

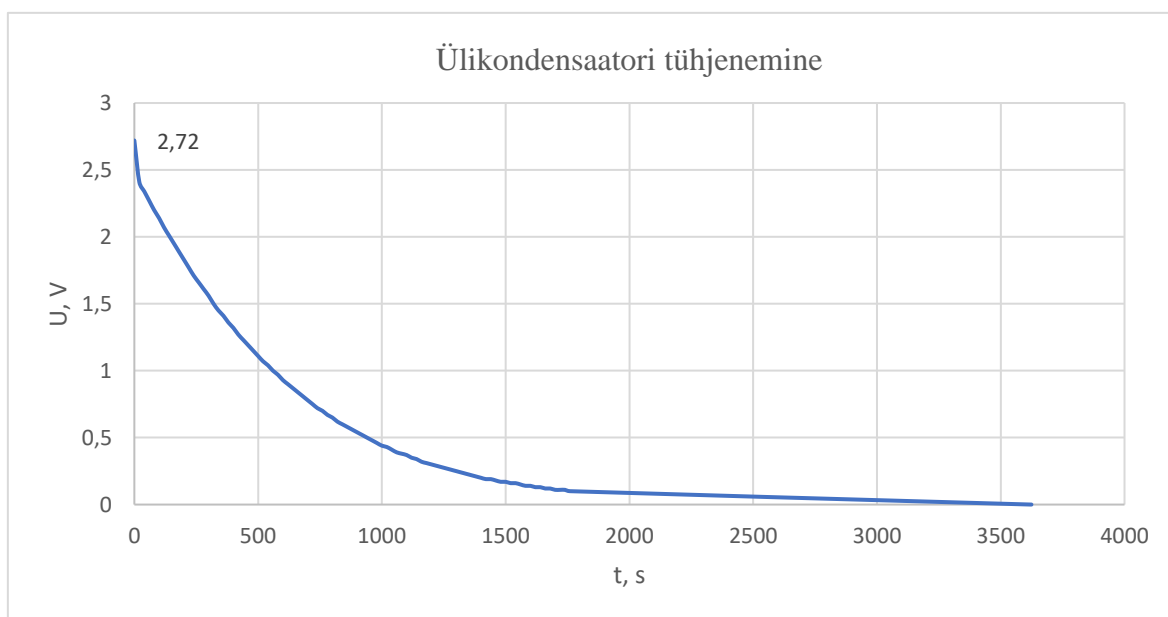
Nagu jooniselt 3.8. on näha, et kondensaatori täis laadimiseks seati paika toiteplokiil pinge milleks on 2.7 V. Katsestendilt mõõdeti multimeetriga tulemust iga 20 sekundi ajavahemiku järel, kuni kondensaatori täitumiseni. Töö autor luges kondensaatori täitunuks siis kui toiteploki vool langes nulli. Mõõtmisel saadud andmed on näha joonisel 3.9.



Joonis 3.9. Ülikondensaatori laadimine $U=f(t)$.

Nagu joonisel 3.9 näha siis ülikondensaatori täitumiseks kulus aega 2365 sekundit ehk 39 minutit ja 25 sekundit. Selline pikk aeg tulenes sellest, kuna sellisel ajahetkel oli toiteploki vaadates vool nullis. 2.7 V täitus 23 minuti ja 49 sekundiga. Lõputöö autori arvates võiks sellest järeldada, et väikeste voolude korral pole ülikondensaatori päris täis laadimine mõistlik. Aga eks see sõltub ka rakendustest kus ülikondensaatorit kasutatakse.

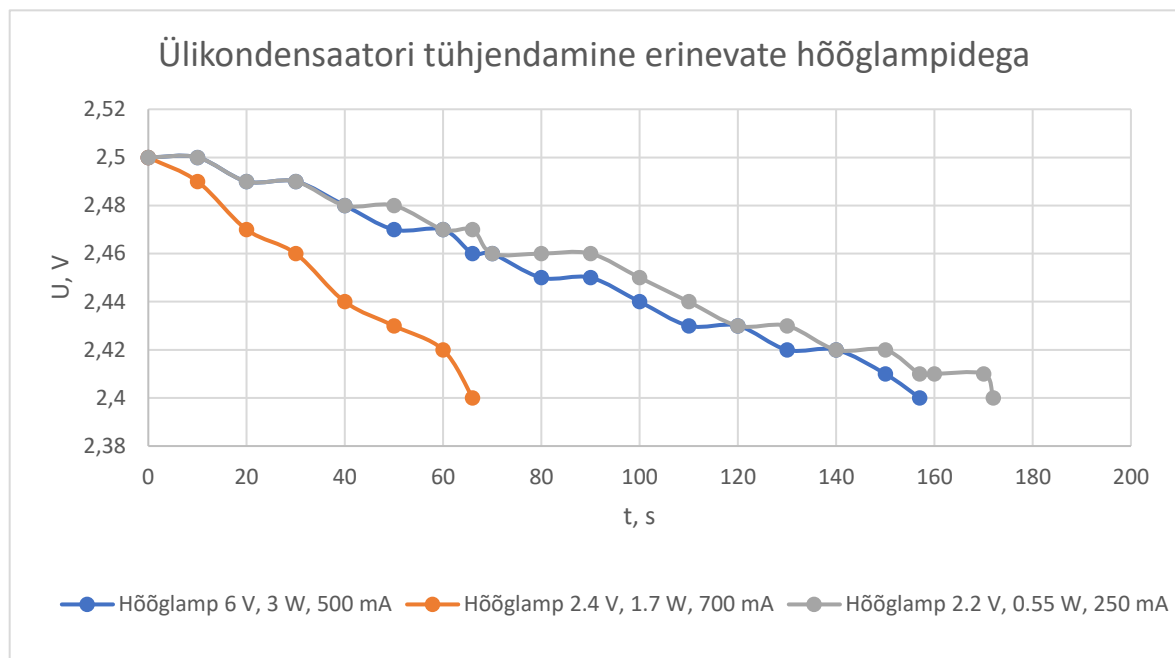
Teise katsena laaditi ülikondensaator tühjaks, katses kasutati kõiki katsestendil olevaid hõõglampe. Ülikondensaatori tühjenemise pinge muutus ajas on välja toodud joonisel 3.10.



Joonis 3.10. Ülikondensaatori tühjenemine $U=f(t)$.

Nagu jooniselt 3.10 näha, siis ülikondensaatori tühjenemiseks, pingeni 0 V kulus 3624 sekundit, ehk 1 tund ja 24 sekundit. Põhjus, miks see tühjenemise protsess on nii pikk on tingitud sellest, et ülikondensaatori tühjenedes väheneb ka pinge ja sellest tingitult väheneb ka hõõglambi võimsus.

Kolmanda katsena töö autor otsustas katsetada hõõglampe eraldi, nagu töös varasemalt mainitud on katsestendis kasutusel kolm erinevate parameetritega hõõglampi. Töö autor otsustas teha kolm ülikondensaatori tühjenemise katset, kasutades selleks erinevate parameetritega hõõglampe. Mõõdeti kolmel korral igat hõõglampi eraldi. Tühjenemise katse teostati 2.5 V kuni 2.4 V, katse tulemusest koostati graafik (joonis. 3.11).



Joonis. 3.11. Ülikondensaatori tühjendamine erinevate hõõglampidega $U=F(t)$.

Joonisel 3.11. põhjal võib järeldada, et kõige efektiivsem hõõglamp ülikondensaatori tühjendamiseks on 2,4 V pingega hõõglamp.

KOKKUVÕTE

Bakalaureusetöö eesmärgiks oli anda ülevaade erinevatest energiasalvestite liikidest ja nende põhiparameetritest. Töös kirjeldati ka kondensaatorite ajalugu, ülikondensaatorite ehitust, omadusi ning kasutusvaldkondi. Praktilises osas koostati skeem programmiga circuit wizard, ning selle skeemi põhjal valmistati ülikondensaatori katsestend. Töö viimases osas valmistati laboratoorne töö, mille vajalikud mõõtmised toimuvad lõputöös valmistatud katsestendiga. Autor teostas katsestendiga lõputöös kolm katset.

Esimese katsena teostati ülikondensaatori täitumise katse. Katse tulemuste põhjal selgus, et autori arvates väikeste voolude puhul ei ole ülikondensaatori täis laadimine otstarbekas. Näitena võiks välja tuua, et ülikondensaatori laadimine pingeni 2.5 V kulus aega 700 sekundit, juhul kui laadida ülikondensaator pingeni 2.7 V kuluks aega 1429 sekundit, sellest võiks järeldada, et lisa 0,2 V laadimiseks kulus 729 sekundit rohkem.

Teise katsena teostati ülikondensaatori tühjenemise katse. Katse tulemuste põhjal selgus, et ülikondensaatori tühjenemiseks pingeni 0 V kulub aega 3624 sekundit. Põhjusena võiks välja tuua selle, et kondensaatori tühjenedes langeb pinge ja pinge langedes hakkab ka hõõglampide võimsus langema ja sellest tingitult on tühjenemise protsess on nii pikk. Tühjenemise protsessi on võimalik kiirendada lühistamise teel, ehk energia eraldub soojusena.

Kolmandana teostati ülikondensaatori tühjenemise katse iga erineva parameetriga hõõglambi kohta, ehk kolm korda. Katse eesmärk oli testida kui kiiresti tühjeneb ülikondensaator iga erineva parameetriga hõõglambi puhul ja visandada tühjenemise graafik iga hõõglambi puhul.

Viimase osana autor koostas laboratoorse töö juhendi. Juhendis on sarnased katsed mis autor on ka lõputöös läbi mõõtnud. Ainukene erinevus tuleneb selles, et laboratoorses töös peab võrdlema kumb tühjeneb kiiremini kas kaks 2.4 V hõõglampi või neli 2.2 V hõõglampi.

SUMMARY

The aim of the bachelor's thesis was to give an overview of different types of energy storage devices and their basic parameters. Also described the history of capacitors, the construction, properties and areas of use of supercapacitors. In practice, a scheme was created with the program circuit wizard, and a test bench for a supercapacitor was prepared based on this scheme. In the last part of the work, a laboratory work was prepared, the necessary measurements of which take place on a test bench. The author performed three experiments on the test bench.

The first test was a capacitor filling test. Based on the results of the experiment, it turned out that in the opinion of the author, full charging of the supercapacitor is not practical for low currents. As an example, it would take 700 seconds to charge the capacitor to 2.5 V, and it took 1429 seconds to charge the capacitor to 2.7 V, it could be concluded that it took 729 seconds longer to charge the additional 0.2 V.

As a second experiment, a capacitor discharge test was performed. The results of the test showed that it takes 3624 seconds for the supercapacitor to discharge to 0 V. The reason could be that when the capacitor is discharged, the voltage drops and when the voltage drops, the power of the incandescent lamps also starts to decrease, and as a result, the discharge process is so long. The discharge process can be accelerated by short-circuiting, then energy is released as heat.

Third, the capacitor discharge test was performed for each incandescent lamp with different parameters three times. The purpose of the experiment was to test how fast the supercapacitor is discharged for each incandescent lamp with different parameters and to draw a discharge graph for each incandescent lamp.

As the last part, the author compiled a guide to laboratory work. The guide contains similar experiments that the author has measured in the dissertation. The only difference is that in laboratory work you have to compare which of the two 2.4 V incandescent lamp or four 2.2 V incandescent lamps discharge faster.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Rosin, A., Link, S., Hõimoja, H., Drovtar, I.** (2015) *Energiasalvestid ja salvestustehnoloogiad*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.
2. Technologies. – *Energy storage*. <https://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/> (02.03.2021)
3. **Yu, A., Chabot, V., Zhang, J.** (2017). *Electrochemical supercapacitors for energy storage and delivery*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
4. Leyden jar. – *David Darling*. https://www.daviddarling.info/encyclopedia/L/Leyden_jar.html (14.03.2021)
5. **Atwell, C.** (2018). Supercapacitors: Past, Present and Future. – *Powerelectronics*. <https://www.powerelectronics.com/technologies/alternative-energy/article/21864122/supercapacitors-past-present-and-future> (15.03.2021)
6. **Soutter, W.** (2012). What is an Ultracapacitor? <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=3044> (16.03.2021)
7. **Kumar Panda, P., Grigoriev, A., Kumar Mishra, Y., Ahuja, R.** (2019). Progress in supercapacitors: roles of two dimensional nanotubular materials. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/na/c9na00307j> (16.03.2021)
8. The Supercapacitor advantage. (2015). – *CAP-XX Supercapacitors*. <https://www.cap-xx.com/resource/the-supercapacitor-advantage/> (16.03.2021)
9. **Raghvendra, N.** What is Supercapacitor (Ultracapacitor) – Characteristics, Working, Types & Applications. <https://electricalfundablog.com/supercapacitor-ultracapacitor-characteristics-working/> (17.03.2021)
10. **Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., Efthimiou, V.** (2008). Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. <http://www.sfu.ca/~mbahrami/ENSC%20461/Project/Some%20papers%20for%20HRS/Overview%20of%20current%20and%20future%20energy%20storage%20technologies%20for%20electric%20power%20applications.pdf> (19.03.2021)
11. **Grobović, P, J.** (2014). *Ultra-capacitors in power conversion systems*. Chichester: John Wiley & Sons.
12. **Haider, A.** (2020). Supercapacitors for Renewable energy applications. <https://electronics360.globalspec.com/article/14903/supercapacitors-for-renewable-energy-applications> (22.03.2021)

13. **Ashfaq, H., Hussain, S., Selim Ustun, T., Javed., Singh.** (2019). Design and performance analysis of a stand-alone pv system with hybrid energy stroage for rural india. https://www.researchgate.net/publication/335457546_Design_and_Performance_Analysis_of_a_Stand-alone_PV_System_with_Hybrid_Energy_Storage_for_Rural_India (18.04.2021)
14. **Izuan Fahmi, M., Rajkumar, R., Arelhi, R.** (2015). The performance of a solar PV system using supercapacitor and varying loads. https://www.researchgate.net/publication/282952294_The_performance_of_a_solar_PV_s_system_using_supercapacitor_and_varying_loads (01.05.2021)
15. Top USA and international capacitor manufacturers and suppliers. – *Thomasnet*. <https://www.thomasnet.com/articles/top-suppliers/capacitor-manufacturers-suppliers/> (15.05.2021)
16. Cells. – *Maxwell Technologies*. <https://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/cells> (18.05.2021)
17. Skeleton Technologies brand values. – *Skeletontech*. <https://www.skeletontech.com/about> (20.05.2021)
18. Datasheet 2.7V 310 & 350F Ultracapacitor cells. – *Maxwell Technologies*. https://www.maxwell.com/images/documents/bcseries_ds_1017105.pdf (21.05.2021)
19. Lamp: 2.2V, 250mA E10 läätsega. – *Oomipood*. https://www.oomipood.ee/product/lamp_522_lamp_2_2v_250ma_e10_laatsenga?q=pirn&page=3
20. Lamp: 2.4V, 700mA, P13.5S kraega krüptoon. – *Oomipood*. https://www.oomipood.ee/product/kpr102_lamp_2_4v_700ma_p13_5s_kraega_kruptoon
21. Lamp: 6V, 500mA, p13.5s kraega. – *Oomipood*. https://www.oomipood.ee/product/aswo_91761_lamp_6v_500ma_3w_p13_5s_kraega
22. Plastikkarp veekindel 75*146*222mm. – *Oomipood*. https://www.oomipood.ee/product/box_g353_plastikkarp_veekindel_75_146_222mm?q=karp&page=3
23. Voltmeeter 15VDC 70*60mm. – *Oomipood*. https://www.oomipood.ee/product/avm7015_voltmeeter_15vdc_70_60mm?q=voltmeeter
24. Ampermeeter 5A DC 45*45mm. – *Oomipood*. https://www.oomipood.ee/product/mie2130_ampermeeter_5a_dc_45_45mm?q=ampermeet er
25. Maketeerimislaua juhtmed 40tk isa-isa 15cm 2.54. – *Oomipood*. https://www.oomipood.ee/product/wpa427_maketeerimislaua_juhtmed_40tk_isa_isa_15cm_2_54mm?q=juhtmed&page=2

26. Klahvlüliti ON-OFF SPST 12V 15A indikaator Roheline. – *Oomipood*.
https://www.oomipood.ee/product/mirs101_3d2_gr_klahvluliti_on_off_spst_12v_15a_roheline_indikaator?q=klahvl%C3%BCliti&page=2
27. Klahvlüliti ON-ON 6A 250V Must. – *Oomipood*.
https://www.oomipood.ee/product/mrs102_ac3_klahvluliti_on_on_6a_250v_must
28. Maketeerimislaud 176*46 mm 700 punkti. – *Oomipood*.
https://www.oomipood.ee/product/pps0700_maketeerimislaud_176_46mm_700_punkti?q=maketeerimislaud

LISAD

Lisa 1. Laboratoorse töö juhend

Laboratoorne töö nr 1.

Ülikondensaatori laadimine ja tühjendamine

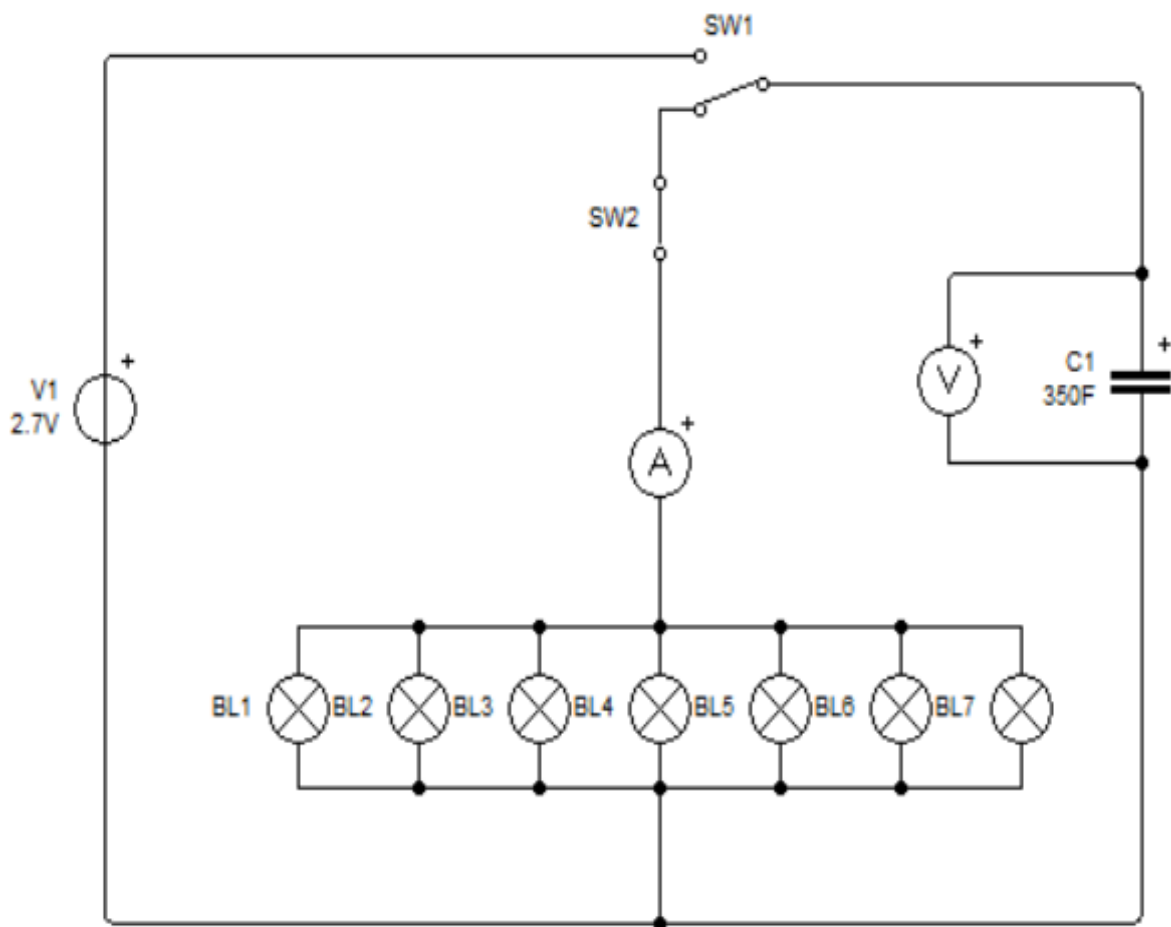
Töö eesmärk:

Ülikondensaatori tühjenemis- ja täitumisprotsessi tundma õppimine ning skeemi koostamine.

Ohutusnõuded:

Peab enne pingestamist skeemi üle kontrollima. Enne kui toiteploki juhtmed ühendada katsestendi külge, siis esmalt tuleb veenduda, et välisel toiteplokil ei oleks pinge kõrgem kui 2.7 V.

Skeem:



Skeemi seletus:

V1 – Toiteplokk,

SW1 – lüliti, ON – ON, (ülikondensaatori laadimine sisse / välja)

SW2 – lüliti, ON – OFF, (ülikondensaatori tühjenemine sisse / välja)

V – Voltmeeter,

A – Ampermeeter,

C1 – Ülikondensaator, 350 F

BL1 – Hõõglamp, 6 V; 3 W; 0,5 A

BL2-BL3 – Hõõglamp, 2,4 V; 1.7 W; 0,7 A

BL4-BL7 – Hõõglamp, 2,2 V; 0,55 W, 0,25 A

Töö käik:

1. Vastavalt laboratoorse töö juhendis olevale skeemile kokku ühendada katsestend.
2. Valmistage ette stopper ajaintervallide mõõtmiseks.
3. Teostada järgnevad katsed:

Tabel 1. Katseandmed

Katse nr.	Tarbija	Ülikondensaatori Laadimine / Tühjenemine	Toiteallika alg pinge.	Ülikondensaatori lõpp pinge	Pinge mõõtmise intervall
1.		Laadimine	2.7 V	2.5 V	20 s
2.	BL4-BL7	Tühjenemine	2.2 V	1.9 V	10 s
3.	BL2 – BL3	Tühjenemine	2.2 V	1.9 V	10 s
4.	BL1 – BL7	Tühjenemine	2.5 V	0.3 V	20 s

Katsete teostamise seletus:

Katse 1: Enne katse alustamist tuleks panna paika pinge ja vool. Esmalt veenduda, et toiteplokkist ei oleks juhtmed ühendatud katsestendiga, siis lülitada toiteplokk sisse ja panna paika pinge 2.7 V. Seejärel lülitada toiteplokk välja, ning ühendada toiteplokkist tulevad juhtmed katsestendiga. Seejärel lülitada toiteplokk uuesti sisse, siis lülitada lülitist SW1 ülikondensaatori laadimine sisse ja siis toiteploki pealt paika panna vool. Kohe kui vool

paigas lülitada laadimine välja, seejärel tühjendada ülikondensaator. Nüüd on toiteplokil paigas nii pinge kui vool ja alustada katse tegemist. Pinge mõõtmiseks igal ajahetkel kasutada multimeetrit ning multimeeter ühendada voltmeetri all olevate väljaviikudega

Katse 2: Tarbijate ühendamisel lähtuda rööpühendusest. SW2 lülitati sisse lülitamisel peaks algama ülikondensaatori tühjenemine. Ülikondensaatori tühjenemisel jälgida multimeetril pinge näitu, juhul kui pinge langeb Tabelis 1 näidatud alg pinge näiduni siis panna käima stopper. Stopper peatada siis kui pinge on langenud Tabelis 1 näidatud lõpp pinge näiduni.

Katse 3: Esmalt laadida ülikondensaator uuesti täis. Tarbijate ühendamisel lähtuda rööpühendusest. SW2 lülitati sisse lülitamisel peaks algama ülikondensaatori tühjenemine. Ülikondensaatori tühjenemisel jälgida multimeetril pinge näitu, juhul kui pinge langeb Tabelis 1 näidatud alg pinge näiduni siis panna käima stopper. Stopper peatada siis kui pinge on langenud Tabelis 1 näidatud lõpp pinge näiduni.

Katse 4: Esmalt laadida ülikondensaator uuesti täis. Tarbijate ühendamisel lähtuda rööpühendusest. SW2 lülitati sisse lülitamisel peaks algama ülikondensaatori tühjenemine. Ülikondensaatori tühjenemisel jälgida multimeetril pinge näitu, juhul kui pinge langeb Tabelis 1 näidatud alg pinge näiduni siis panna käima stopper. Stopper peatada siis kui pinge on langenud Tabelis 1 näidatud lõpp pinge näiduni.

4. Iga katse kohta vormistada graafik $U=f(t)$.

5. Võrrelda katse 2 ja katse 3 tulemust, kumba katsega tühjeneb ülikondensaator kiiremini.

Lisa 2. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Raul Suurkask,
sünniaeg 21.05.1992,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

Ülikondensaatori katsestend,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja(d) on Andres Annuk,

(juhendaja(te) nimi)

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor /allkirjastatud digitaalselt/
(allkiri)

Tartu, 31.05.2021
(kuupäev)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Andres Annuk /allkirjastatud digitaalselt/
(juhendaja nimi ja allkiri)

31.05.2021
(kuupäev)